

## 합성형 반강자성 결합 재료의 자기장 세기에 따른 토오크 신호 분석

윤석수 · 전우상 · 김동영\*

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 송천동 388, 760-749

(2011년 5월 27일 받음, 2011년 6월 1일 최종수정본 받음, 2011년 6월 1일 게재확정)

본 연구에서는 합성형 반강자성 결합 특성을 갖는 CoFeB/Ru/CoFeB 박막 재료에서 자화용이축에서 측정된 플롭자기장( $H_F$ )과 자화곤란축에서 측정된 포화자기장( $H_s$ )을 경계로 달라지는 토오크 신호를 분석하였다.  $H_F$ 의 자기장 세기에서 음의 일축이방성 특성이 최소가 되며, 이는 반강자성 결합에 의한 자화 상쇄 효과로 강자성층의 자화용이축이 곤란축과 같은 역할을 하기 때문이다.  $H_F < H < H_s$ 의 자기장의 세기에서는 두 강자성층이 형성한 자화방향의 사이각이 증가하면서 쌍축이방성 특성을 유도시킨다. 이러한 쌍축이방성 유도 특성은 두 강자성층의 자화가 서로 수직이 되는 자기장의 세기에서 최대가 된다. 한편 자기장의 세기가  $H_s$  이상에서는 CoFeB의 고유한 일축이방성 특성을 보인다. 이러한 자기이방성 특성은 두 강자성층의 반강자성 결합에 의한 자화 특성을 반영하고 있음을 Stoner-Wohlfarth 모델 분석을 통하여 알 수 있다.

**주제어** : 합성형 반강자성 결합, 플롭자기장, 토오크 신호, 쌍축이방성

### I. 서 론

강자성-금속-강자성의 삼층 박막구조에서 두 강자성층 사이에 삽입한 금속막에 의한 RKKY(Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida) 상호작용이 반강자성 결합 특성을 보일 때 합성형 반강자성(Synthetic Antiferromagnetic: SAF) 재료라고 한다[1]. SAF재료에서 금속막에 의하여 분리된 두 강자성층 상호간에 작용하는 반강자성 결합에 의하여 강자성층의 자구들은 단일 자구 형태를 이루며, 이들 단일자구는 서로 반대방향으로 정렬하여 삼층 박막 재료의 전체 자화량이 최소가 되게 만든다. 이러한 SAF재료는 하드디스크드라이브에서 정보를 기록할 때 생성되는 자속의 회귀 경로(return path) 형성 및 정보기록 헤드의 자속을 집중하여 정보저장 밀도를 향상시키기 위한 자기 이미징 기법에 활용되고 있는 SUL(soft under layer)로 사용되고 있다[2, 3]. 초기 SUL로 사용된 단일층 연자성 재료는 정보 기록시 불연속적인 자화 변화에 의한 스파이크 노이즈를 발생시켰으며, 이러한 자기 노이즈를 제거할 수 있는 SAF재료가 SUL로 사용되고 있다. 또한 스핀 밸브형 터널링 자기저항 소자에서는 자유층의 열적 안정성 및 자기저항비 향상을 위하여 사용되고 있다[4]. 따라서 SAF 결합 특성이 우수한 재료의 개발 및 특성 분석을 위한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 특히, 자화 용이축에서 측정된 자화곡선으로부터 도출한 플롭자기장( $H_F$ )의 세기로부터 SAF 재료의 반강자성 결합특성을 분석하고 있으며[5, 6], 강자성 공명을 이용하여 SAF재료의 공명 특성을 분석하고 있다[7].

자성재료의 중요한 특성인 자기 이방성 상수를 직접 측정하는 토오크(Torque) 측정기는 일반적으로 자화를 포화시킨 고자기장 하에서 측정된 토오크 신호로부터 이방성 상수를 구하기 위하여 주로 사용하고 있다. 그러나 포화 자기장 이하에서 측정된 토오크 신호는 자성재료의 자화 변화를 반영하고 있으며, 일축이방성 특성을 갖는 단일층 자성재료 및 교환 결합력을 갖는 강자성/반강자성 재료의 자화 변화 분석에서도 활용되고 있다[8, 9]. 그러나, SAF재료의 자화 변화 특성을 분석하기 위하여 토오크 측정기를 이용하여 자기장의 세기에 따른 토오크 신호를 분석한 연구 결과는 없었다.

따라서 본 연구에서는 SAF 결합 특성을 갖는 CoFeB/Ru/CoFeB재료에서 자기장의 세기에 따른 자화곡선 및 토오크 신호를 측정하였으며, S-W 모델(Stoner-Wohlfarth model)을 사용하여 자화 변화에 따른 자기 이방성 특성을 분석하였다.

### II. 실험방법

SAF 시료인  $(\text{Co}_{65}\text{Fe}_{35})_{88}\text{B}_{12}(30\text{ nm})/\text{Ru}(1.86\text{ nm})/(\text{Co}_{65}\text{Fe}_{35})_{88}\text{B}_{12}(30\text{ nm})$ 는 고진공 DC 스퍼터링 챔버에서 glass기판 위에 상온에서 증착하였다. 비정질  $(\text{Co}_{65}\text{Fe}_{35})_{88}\text{B}_{12}$ 과 Ru 박막은 0.6 Pa의 Ar 분위기에서 2.5 nm/s와 0.15 nm/s의 증착 속도로 각각 증착하였다. 또한 하부층으로 Ta(5 nm)를 사용하였으며, 시편의 산화를 방지하기 위한 상부층으로 Ta(5 nm)를 증착하였다. SAF 박막 재료의 자성특성은 자화곡선 및 토오크 신호를 측정하여 분석하였다. 자화용이축과 자화곤란축에서 자기장의 세기에 따른 자화곡선은 VSM(Vibrating Sample Magnetometer)을 사용하여 측정하였다. 토오크 신호를 측정

\*Tel: (054) 820-5445, E-mail: dykim@andong.ac.kr

하기 위하여 영점보정방법(null method)을 채택하여 민감도가  $10^{-3}$  dyne cm인 토오크 측정기를 사용하였다. 이때 일정한 자기장을 인가한 후 자기장의 방향( $\theta_H$ )을  $-90^\circ \sim 450^\circ$ 까지 순방향과 역방향으로 회전하는 자동화된 장치에서 자기장의 방향에 따른 토오크 신호를 측정하였다. 자기장의 세기에 따른 자기이방성 특성은 자기장의 세기를 변화시키면서 측정된 토오크 신호 각각을 푸리에(Fourier) 변환하여 구하였다. 측정된 자화 곡선과 토오크 신호는 S-W 모델을 사용하여 분석하였다.

### III. 실험결과 및 고찰

두 개의 강자성층 박막 사이에 얇은 금속막을 삽입한 강자성/금속/강자성 삼층 구조에서, 금속박막의 전도전자에 의한 간접적인 상호작용에 의하여 두 강자성층은 RKKY 결합 특성을 보인다. 이러한 결합 특성은 금속 박막의 두께에 따라 강자성 결합과 반강자성 결합이 주기적으로 진동하는 현상을 보인다[1]. 이때, 강자성/금속/강자성 삼층 구조에서 반강자성 결합 특성을 보이는 재료를 합성형 반강자성(Synthetic Antiferromagnetic: SAF) 재료라고 한다.

이러한 SAF 재료는 두 강자성층 상호간에 작용하는 반강자성 결합에 의하여 강자성층 각각의 자구들은 단일자구 형태를 이루며, 단일자구의 자화곡선을 잘 설명하는 S-W 모델을 적용하여 자화 특성 분석이 가능하다[10].

따라서, 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 동일한 두께  $t_F$ 를 갖는 두 강자성층이 반강자성 결합에너지  $J_1$ 과 편향이나 거칠기에 기인하는  $J_2$ 에 의한 결합 특성을 보이는 SAF 재료의 자기장의 세기에 따른 자화 특성을 분석하기 위하여 S-W 모델을 사용하였다. 이 모델은 두 강자성층의 에너지 밀도로부터

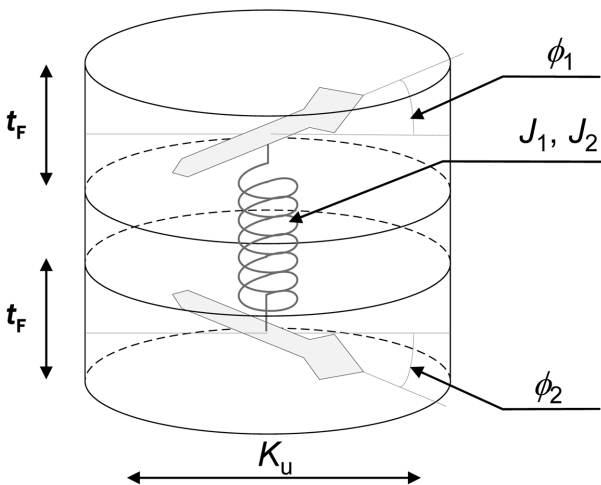


Fig. 1. Schematic diagram of ferromagnet-metal-ferromagnet trilayer structure.

터 자구의 방향에 대한 해를 구하며, SAF 구조를 갖는 소재에 대하여 단위면적당 에너지 밀도( $E_T$ )는 다음과 같이 표현된다[3].

$$E_T = -HM_s t_F \{ \cos(\phi_1 - \theta_H) + \cos(\phi_2 - \theta_H) \} + K_d t_F \{ \sin^2 \phi_1 + \sin^2 \phi_2 \} + J_1 \cos(\phi_1 - \phi_2) + J_2 \cos^2(\phi_1 - \phi_2) \quad (1)$$

여기서  $M_s$  및  $K_d$ 는 강자성층의 포화자화량 및 일축이방성 상수이며,  $\theta_H$ 는 자화 용이축으로부터 고려한 외부 인가자기장의 방향을 나타낸다.  $\phi_1$  및  $\phi_2$ 는 두 강자성층의 자화 방향을 각각 나타낸다. 그리고  $J_1$ 은 반강자성 결합에너지(bilinear)이며,  $J_2$ 는 반강자성 결합특성을 방해하는 결합 에너지(biquadratic)이다[6]. SAF재료에 자기장을 인가한 경우, 자화는 항상 에너지가 최소가 되는 방향으로 향한다. 따라서 에너지 밀도가 최소가 되는 조건을 만족하기 위해서는  $\phi_1$  및  $\phi_2$ 에 대한  $E_T$ 의 일차 미분값이 영이 되어야 한다. 식(1)로부터 에너지 밀도가 최소가 되는 즉,  $\partial E_T / \partial \phi_1 = 0$ 과  $\partial E_T / \partial \phi_2 = 0$ 을 만족하는 조건으로부터 두 강자성층의 평형 자화 각도  $\phi_{1eq}$  및  $\phi_{2eq}$ 를 구할 수 있다. 이들  $\phi_{1eq}$  및  $\phi_{2eq}$  값을 이용하여 SAF 재료의 자기장의 세기에 따른 자화곡선을 계산할 수 있다.

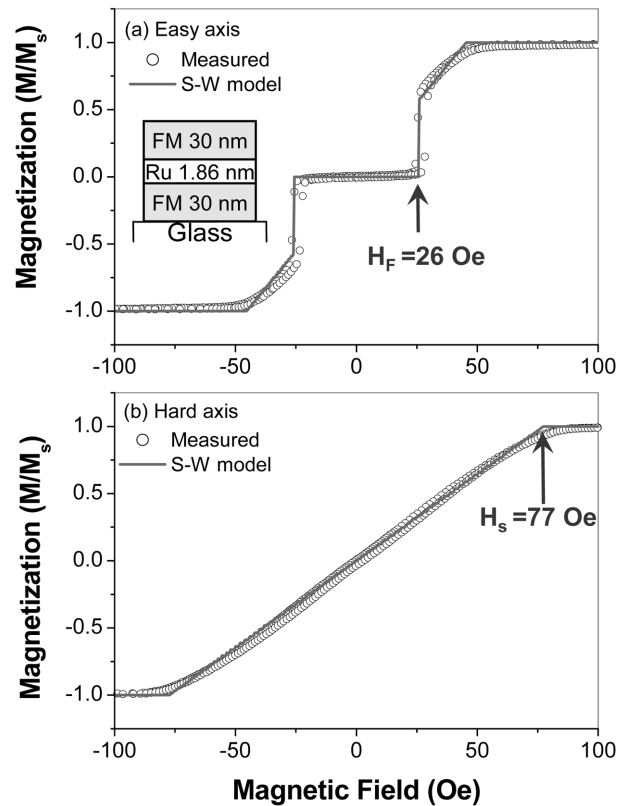


Fig. 2. Magnetization curve measured at (a) easy axis and (b) hard axis in CoFeB/Ru/CoFeB thin film. The solid lines are calculated by S-W model.

$$M = M_s(\cos\phi_{1eq} + \cos\phi_{2eq}) \quad (2)$$

식(2)로부터 SAF 재료의 자화량은 두 강자성층의 자화량의 합으로 표현된다.

Fig. 2는 CoFeB/Ru/CoFeB의 자화용이축( $\theta_H = 0^\circ$ )과 자화곤란축( $\theta_H = 90^\circ$ )에서 VSM으로 측정된 자화곡선을 보인다. 자화용이축에서 측정된 자화곡선은 플롭자기장( $H_F$ : flopping field)까지 자화량이  $M = 0$ 으로 일정하게 유지된다. 이는 반강자성 결합에 의하여 두 강자성층의 자구가 서로 반대방향으로 정렬하여( $\phi_{1eq} = 0^\circ, \phi_{2eq} = 180^\circ$ ) 서로의 자화량을 상쇄하기 때문이다. 따라서, CoFeB/Ru/CoFeB의 자화 용이축 방향으로 자기장을 인가하는 경우 반강자성 결합에 의한 자화량 상쇄는 식(1)에서 보인 반강자성 결합에너지  $J_1$ 을 극복

하는 플롭자기장인  $H_F = 26$  Oe까지 일정하게 유지된 것이다. 자화곤란축에서 측정된 자화곡선은 포화 자기장인  $H_s = 77$  Oe까지 선형적으로 증가하다가 그 이상의 자기장에서는 일정한 포화자화량을 유지하는 모습을 보인다. Fig. 2에서 실선은 식(1)과 (2)의 S-W 모델로 계산한 자화곡선이며, 실험결과와 거의 일치한다. 이때 CoFeB/Ru/CoFeB 재료의 자화곡선을 계산하기 위하여 다음의 변수 값들을 사용하였다:  $t_F = 30$  nm,  $M_s = 1500$  emu/cm<sup>3</sup>,  $K_u = 1.4 \times 10^3$  erg/cm<sup>3</sup>,  $J_1 = 0.14$  erg/cm<sup>2</sup> 그리고  $J_2 = 0.005$  erg/cm<sup>2</sup>. 식(1)로부터 강자성층의 두께가 매우 얇은 박막에서  $J_1 \gg 2J_2 + K_u t_F$ 를 만족하는 경우, SAF재료를 특성화하는  $H_F$ 는 다음과 같이 표현된다[3].

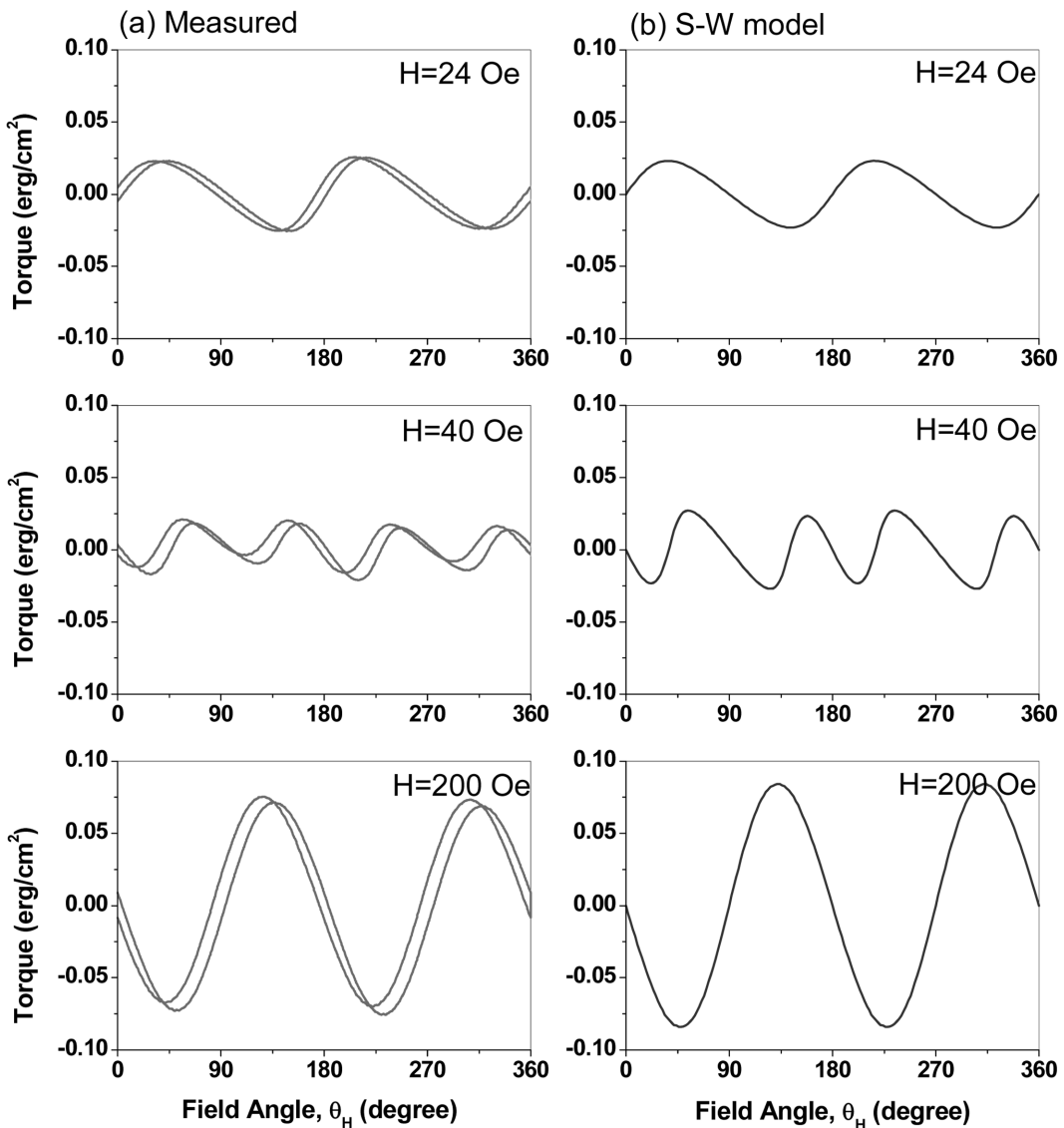


Fig. 3. (a) Measured torque signals and (b) calculated torque signals by S-W model with magnetic field angle ( $\theta_H$ ) at  $H = 24$  Oe,  $H = 40$  Oe and  $H = 200$  Oe, respectively.

$$H_F = \frac{2}{M_s t_F} \sqrt{K_u t_F (J_1 - 2J_2 - K_u t_F)} \quad (3)$$

식(3)으로부터  $H_F$ 는 반강자성 결합에너지  $J_1$ 에 따라 증가하고, 편홀이나 표면거칠기에 의한  $J_2$ 에 따라 감소하는 특성을 보인다. 본 연구에서 사용한 CoFeB/Ru/CoFeB 재료는  $J_1 \gg J_2$ 이므로 반강자성 결합이 강하게 작용하며, 편홀이 거의 없고 표면거칠기가 우수한 소재임을 알 수 있다. 이러한 CoFeB/Ru/CoFeB 재료에 대하여 자기장 방향에 따른 토오크 신호로부터 자화에 따른 이방성 특성을 분석하였다. 일반적으로 자성재료의 토오크 신호( $\tau$ )는 자기장 각도에 따른 에너지 밀도의 변화로 정의되며 다음과 같이 표현된다[11].

$$\tau(\theta_H) = - \frac{\partial E_T}{\partial \theta_H} \quad (4)$$

SAF 재료에서 자기장 각도( $\theta_H$ )에 따른 토오크 신호는 두 강자성체의 평형 자화 각도  $\phi_{1eq}$  및  $\phi_{2eq}$ 를 (4)식에 대입하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tau(\theta_H) = HM_s t_F [\sin(\phi_{1eq} - \theta_H) + \sin(\phi_{2eq} - \theta_H)] \quad (5)$$

포화자기장의 세기 이하에서 보이는 토오크 신호는 자성재료의 자화 특성을 반영하고 있으며, 포화 자기장 이하에서 측정된 토오크 신호로부터 자기장의 세기에 따른 자화 특성을 분석하는데 이용할 수 있다. 따라서 자기장의 세기를 변화 시킨 후 측정된 토오크 신호를 푸리에 변환을 통하여 자기장의 세기에 따른 이방성 특성을 구할 수 있다.

$$\tau(\theta_H) = K_1 \sin^2 \theta_H + K_2 \sin^2 2\theta_H \quad (6)$$

여기서  $K_1$ 는 일축이방성(uniaxial anisotropy) 특성을 의미하며,  $K_2$ 는 쌍축이방성(biaxial anisotropy) 특성을 의미한다.

Fig. 3(a)는 자기장의 세기( $H$ )가 각각  $H_F$ 보다 작은 경우 ( $H=22$  Oe), 자기장의 세기가  $H_F$ 보다 크고  $H_S$ 보다 작은 경우 ( $H=40$  Oe) 그리고 자기장의 세기가  $H_S$ 보다 큰 경우 ( $H=200$  Oe)에서 측정된 토오크 신호를 보인다. S-W 모델로 계산한 토오크 신호 특성은 Fig. 3(b)에서 보인다. 이때 자화 곡선을 계산하기 위하여 사용한 동일한 변수값들을 토오크 신호 계산을 위하여 사용하였다. Fig. 3(a)에서 보인 측정된 토오크 신호는 비가역적인 자구 변화에 의하여 약간의 히스테리시스를 보이고 있으나 전체적인 경향은 Fig. 3(b)에서 보인 S-W 모델로 계산한 결과와 일치한다. 따라서 S-W 모델로 계산한 결과를 바탕으로 측정된 토오크 신호를 분석하였다.

$H_F$ 보다 작은 자기장에서 측정된 ( $H=22$  Oe) 토오크 신호는 음의 일축 이방성 특성을 보인다. 이는 강자성층의 자화 용이축에서 두 강자성층의 자화량이 상쇄되어 자화곤란축의

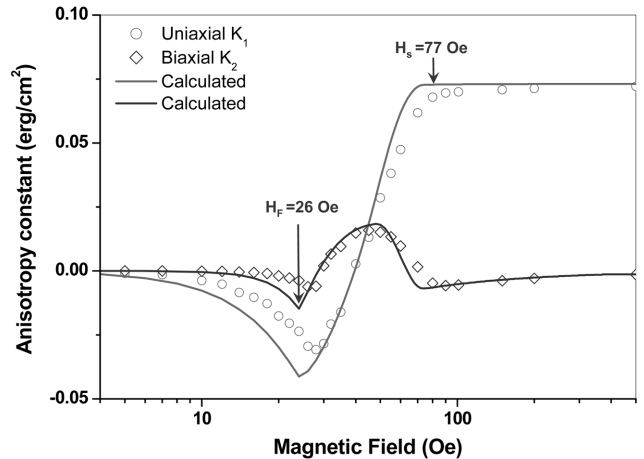


Fig. 4. Uniaxial and biaxial anisotropy constant with respect to the applied magnetic field. The solid lines are calculated by S-W model.

역할을 하기 때문이다. 즉, 강자성층의 자화용이축 방향에서 두 강자성층의 자화량이 작아지는 현상이 자구의 회전이 어려운 방향인 자화곤란축과 유사한 특성을 보이므로 토오크 신호는 음의 일축이방성 특성을 보인다. 이러한 현상은 두 강자성층의 반강자성 결합 때문에 나타나는 현상이다. 또한 자기장의 세기가  $H_F$ 보다 크고  $H_S$ 보다 작은 경우 ( $H=40$  Oe) 토오크 신호는 쌍축이방성 특성을 보인다. 이는 두 강자성층이 형성한 자화방향의 사이각이 증가하면서 쌍축이방성 특성을 유도시키고 있기 때문이다. 한편, 자기장의 세기가  $H_S$ 보다 큰 경우 ( $H=200$  Oe)에서는 전형적인 일축이방성 특성을 보이며, 이는 CoFeB 재료의 고유한 일축이방성 상수를 의미한다.

Fig. 4는 토오크 신호를 푸리에 변환을 통하여 산출한  $K_1$ 과  $K_2$ 의 자기장 세기 의존성을 보인다. 일축이방성 특성을 나타내는  $K_1$ 은 저자기장의 세기에서 음의 일축이방성 특성을 보이며, 이 특성은 자기장의 세기에 따라서 감소하다가  $H_F$ 에서 최소가 된 후 증가하기 시작하여 양의 일축이방성 상수로 변화된다.  $H_S$  이상에서 보이는 일정한 일축이방성 상수는 두 강자성층이 포화된 상태에서 보이는 전형적인 일축이방성 에너지 상수 즉 식(1)에서 보인 CoFeB의 일축이방성 상수  $K_u$ 를 의미한다. 한편, 쌍축이방성 특성을 나타내는  $K_2$ 는 자기장의 세기가  $H_F < H < H_S$ 에서 두드러지게 유도되고 있으며, 쌍축이방성 특성은 자화곤란축 방향에서 두 강자성층의 자화가 서로 수직이 되는 자기장의 세기에서 최대가 된다. 이렇듯 CoFeB/Ru/CoFeB 재료에서 보인 이방성 상수들의 변화 특성은 두 강자성층의 반강자성 결합에 의한 특이한 자화 변화를 반영하고 있으며, 이러한 특성은 S-W 모델로 계산한 결과와 비교 분석을 통하여 그 원인을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

일축이방성 특성을 갖는 비정질 CoFeB을 사용하여 반강자성 결합 특성을 갖는 CoFeB/Ru/CoFeB 재료를 제작하였다. 반강자성 결합특성을 나타내는 플롭자기장( $H_F$ )의 세기는 26 Oe였으며 포화자기장( $H_s$ )은 77 Oe였다.  $H_F$ 의 자기장 세기에서 측정된 토오크 신호는 음의 일축이방성 특성이 최소가 되었다. 이러한 음의 일축이방성 특성은 반강자성 결합에 의하여 CoFeB의 자화 용이축 방향에서 나타나는 자화 상쇄에 기인하며, 이로 인하여 용이축이 곤란축과 같은 역할을 하기 때문이다.  $H_F < H < H_s$ 의 자기장의 세기에서는 두 강자성층이 형성한 자화방향의 사이각이 증가하면서 쌍축이방성 특성을 유지시킨다. 한편, 자기장의 세기가  $H_s$  이상에서는 전형적인 일축이방성 특성을 보인다. 이러한 CoFeB/Ru/CoFeB 재료에서 보인 이방성 상수들의 변화 특성은 반강자성 결합력을 갖는 두 강자성층에서 나타나는 특이한 자화 변화를 반영하고 있음을 S-W 모델 계산을 통하여 알 수 있다.

#### 감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-

0005141).

#### 참고문헌

- [1] S. S. P. Parkin, Phys. Rev. Lett. **67**, 3598 (1991).
- [2] M. Desai, A. Misra, and W. D. Doyle, IEEE Trans. Magn. **41**, 3151 (2005).
- [3] A. Hashimoto, S. Saito, D. Y. Kim, H. Takahashi, T. Ueno, and M. Takahashi, IEEE Trans. Magn. **42**, 2342 (2006).
- [4] S. Ikeda, J. Hayakawa, Y. Ashizawa, Y. M. Lee, K. Miura, H. Hasegawa, M. Tsunoda, F. Matsukura, and H. Ohno, Appl. Phys. Lett. **93**, 082508 (2008).
- [5] B. Heinrich, J. F. Cochran, M. Kowalewski, J. Kirshner, Z. Celinski, A. S. Arrott, and K. Myrtle, Phys. Rev. B **44**, 9348 (1991).
- [6] J. F. Bobo, H. Kikuchi, O. Redon, E. Snoeck, M. Piecuch, and R. L. White, Phys. Rev. B **60**, 4131 (1999).
- [7] A. Layadi, J. Appl. Phys. **83**, 3735 (1997).
- [8] D. Y. Kim and S. S. Yoon, J. Kor. Mag. Soc. **19**, 147 (2009).
- [9] M. Tsunoda, Y. Tsuchiya, T. Hashimoto, and M. Takahashi, J. Appl. Phys. **87**, 4375 (2000).
- [10] E. C. Stoner and E. P. Wohlfarth, Phil. Trans. Roy. Soc. **A240**, 599 (1948).
- [11] S. Chikazumi, Physics of Magnetism, Wiley, New York (1964) P. 131.

## Magnetic Field Dependence of Torque Signals in Synthetic Antiferromagnetic Coupled CoFeB/Ru/CoFeB Thin Film

Seok Soo Yoon, Woo Sang Jun, and Dong Young Kim\*

Department of Physics, Andong National University, Andong 760-749, Korea

(Received 27 May 2011, Received in final form 1 June 2011, Accepted 1 June 2011)

We have analyzed the torque signals measured in synthetic antiferromagnetic (SAF) coupled CoFeB/Ru/CoFeB thin film, which signals were drastically changed at flopping field ( $H_F$ ) and saturation field ( $H_s$ ). The minimum value of negative uniaxial anisotropy constant ( $-K_1$ ) was appeared at  $H_F$ . The  $-K_1$  was due to the zero net magnetization by the antiferromagnetic coupling between two ferromagnetic layers. Whereas, the biaxial anisotropy constant ( $K_2$ ) was induced in the field range of  $H_F < H < H_s$ . The induced  $K_2$  was originated from deviation angles between magnetization directions of two ferromagnetic layers. And at  $H > H_s$ , intrinsic uniaxial anisotropy constant of CoFeB layer was observed. These change of the anisotropy constant with magnetic field was explained by the magnetization process of two ferromagnetic layers based on Stoner-Wohlfarth model calculation for SAF thin film.

**Keywords :** synthetic antiferromagnetic coupling, flopping field, torque signal, biaxial anisotropy